Monaco: Motorized Wedge の MU 計算

本資料にて Monaco の Motorized Wedge を使った計画においての MU 算出方法について説明します。

【参考資料】
Elekta 治療機の「取扱説明書-クリニカルモード」
「Monaco External Beam Dose Calculation Algorithms」

【Motorized Wedge とは】
エレクタ治療機は物理ウェッジ（≒60 度）が内装されています。任意の角度のウェッジフィールドの線量分布はオープンと物理ウェッジの線量分布の合成になります(図 1)。それぞれの照射量（MU）の比率を変えることで任意の角度の線量分布を実現します。

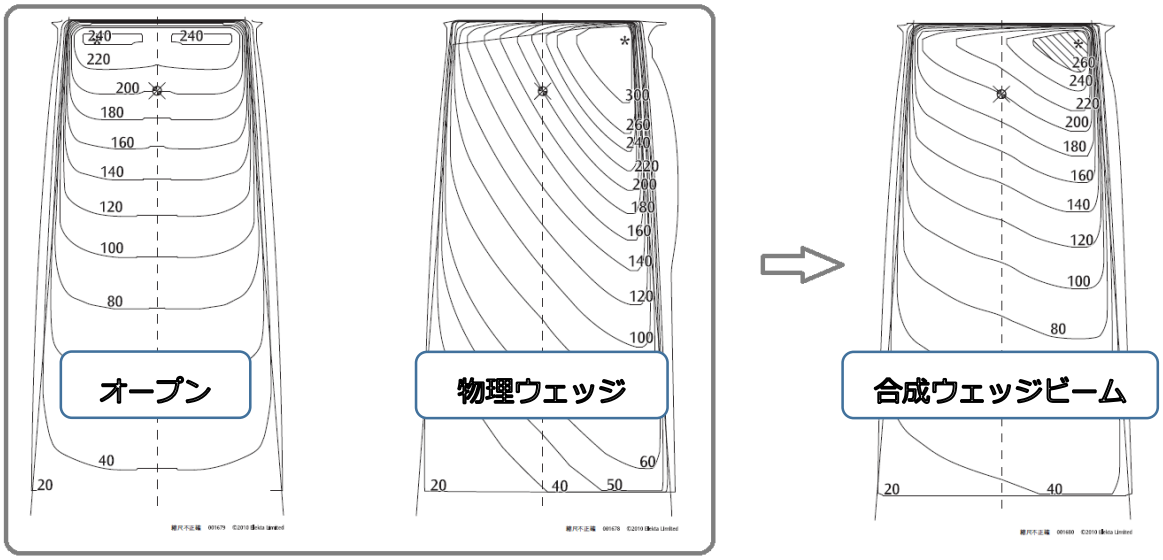

図1：Motorized Wedge概念図：等線量曲線[1]

ウェッジ角度の定義は以下のとおりです。
「ウェッジ角度は、水ファントムの深度 10 cm での、ウェッジビームの等線量線とビームの中心軸に対する法線とで形成される角度です [1]」

[1] 「Agility および Integrity™ R3.0 取扱説明書クリニカルモード」より抜粋

【Monaco での Motorized Wedge の MU 計算について】
以上のセクションで Motorized Wedge の概念を明確にしたところ、Monaco での任意の角度においての MU 計算方法について考えます。

1．オープンと物理ウェッジの MU 比について
任意の角度のウェッジを使う場合は、物理ウェッジの MU とオープン MU の比を以下の式で算出しています。

トータル MU に対するウェッジ MU の比率

$$w_{wedge}=\frac{g_\theta \cdot m_{wedge}}{g_\theta \cdot m_{wedge}+(1-g_\theta)\cdot m_{open}}$$

トータル MU に対するオープン MU の比率

$$w_{open}=\frac{(1-g_\theta)\cdot m_{wedge}}{g_\theta \cdot m_{wedge}+(1-g_\theta)\cdot m_{open}}$$

以上の式のファクターは以下のとおり定義されます。

g_θ = $\tan\theta$ / $\tan\theta_{max}$ になります。
θ =プランにて設定する角度
θ_{max} = 60 度（公称）
m_{open} = 校正深におけるオープンの 1Gy 当たりの MU 値 [MU/Gy]
m_{wedge} =校正深におけるウェッジの 1Gy 当たりの MU 値 [MU/Gy]

なお、m_{open} と m_{wedge} はモデリング用に測定した『Absolute Dose Calibration in water at isocenter point, 10cm Depth (90 cm SSD) 』の値[Gy/100MU]の逆数の 100 倍です。

2．合成角度と線量比の関係
上記式の理解を深めたいと思います。等線量曲線から具体的に考えてみましょう。合成角度 θ はオープンとウェッジの線量合成の結果から得られます。例えば、図 2 のように 60 度ウェッジの *XZ* 平面上の等線量曲線を例にとって説明します。

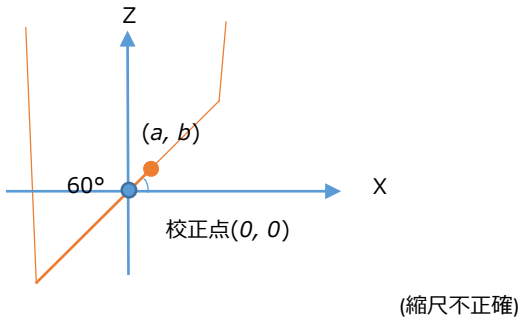

図 2：ウェッジ 60 度の等線量曲線

校正点の座標（図 2 では（0,0）と設定）と同じ線量になっている座標(a,b)があったとします。これと校正点を結ぶ直線は以下の式で表せます。

$$Z(X)_{\theta=60} = \left(\frac{b}{a}\right) \cdot X = \tan 60 \cdot X$$

他方、オープンの等線量曲線を直線で表すと $Z(X)_{\theta=0}=\tan 0 \cdot X$、つまり $Z(X)_{\theta=0}=0$ です。X＝1 の時の各ウェッジ角度、θ の座標は図 3 のようになります。

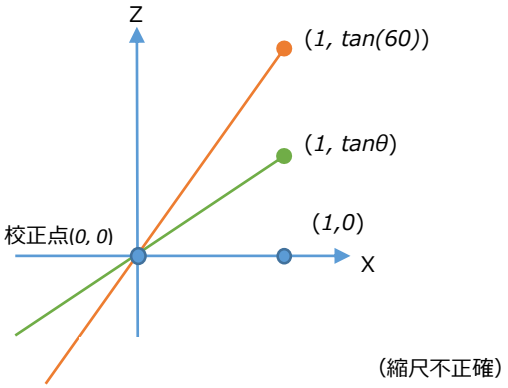

図 3：等線量の概念図、X=1 の 3 つのポイントは物理ウェッジ（60°、オレンジ）、物理ウェッジ+オープン（θ、緑）、オープン（0°、青）の等線量ポイントを示しています。

これらの座標は校正点を基準に同じ線量の位置を示しています。物理ウェッジとオープンを合成した場合の線量はどうなるでしょうか。合成時のトータル線量を $D_{open}+D_{wedge}$ とします。トータル線量に対するウェッジ線量 D_{wedge} の割合から tan60 と tan0 の点の間に新しい等線量点(1, tanθ)が決まります。(図 4)

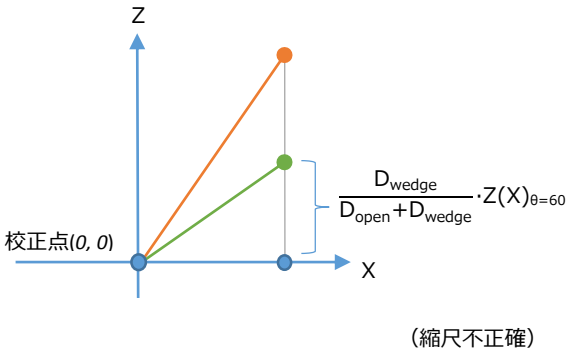

図４：線量比とウェッジ角度の関係

$Z(X)_{\theta=0}=0$ なので、

$$Z(X)_{\theta}=\left(\frac{D_{wedge}}{D_{open}+D_{wedge}}\right)\cdot Z(X)_{\theta=60}$$

の関係になります。ここで$\{D_{wedge} / (D_{open} + D_{wedge})\}$を g_{θ} と置けば、

$$Z(X)_{\theta}=g_{\theta}\cdot Z(X)_{\theta=60}$$

となります。$Z(X)_{\theta}= \tan\theta\cdot X$、$Z(X)_{\theta=60}=\tan60\cdot X$ なので、

$$g_{\theta}=\tan\theta / \tan60$$

です。つまり、合成角度θは線量比がわかれば求めることができます。逆に、治療計画として合成角度θを得るためには線量比を求める必要があるということになります。

3．線量比から MU 比の算出

以上までは、線量比として話を進めてきました。次に、MU の比について考えてみます。トータル、ウェッジ、オープンの MU をそれぞれ、MU_{total}、MU_{wedge}、MU_{open} とします。線量から MU への変換は、線量の割合に 1Gy あたりの MU である m_{wedge}、m_{open} をそれぞれに乗じます。MU 比は以下のようになります。

$$MU_{wedge}: MU_{open}:MU_{total} =g_{\theta}\cdot m_{wedge} : (1-g_{\theta})\cdot m_{open} : g_{\theta}\cdot m_{wedge} + (1-g_{\theta})\cdot m_{open}$$

上記の比から、それぞれの MU の割合を求めることができます。

トータル MU に対するウェッジ MU の比率、w_{wedge}

$$w_{wedge}=\frac{MU_{wedge}}{MU_{total}}=\frac{g_{\theta}\cdot m_{wedge}}{g_{\theta}\cdot m_{wedge}+(1-g_{\theta})\cdot m_{open}}$$

トータル MU に対するオープン MU の比率、w_{open}

$$w_{open}=\frac{MU_{wedge}}{MU_{total}}=\frac{(1-g_{\theta})\cdot m_{wedge}}{g_{\theta}\cdot m_{wedge}+(1-g_{\theta})\cdot m_{open}}$$

以上の式は、水ファントムでの SAD セットアップの 10×10, 10cm 深という理想的な状態で、合成角度の MU 比を考えていることになります。

4．投与線量と MU

ここからは、MU_{total} の求め方について説明します。最終的な MU（MU_{total}）の算出には処方点への投与線量 $D_{prescribed}$[cGy]、処方点における 1MU あたりのオープン線量 D'_{open}[cGy/MU]、ウェッジ線量 D'_{wedge}[cGy/MU]が必要になります。Monaco はこれらの線量の算出方法をアルゴリズムとして持っていますが、手計算で利用することはできませんので、手計算したい場合は別途考える必要があります。

さて、処方点に対する合成ウェッジの 1MU あたりの線量を求める方法についてです。w_{open} と w_{wedge} は比率でした。つまり、1MU は w_{open} と w_{wedge} に振り分けられますので、D'_{open} に w_{open} に乗ずればオープン寄与分の線量になり、D'_{wedge} に w_{wedge} を乗ずればウェッジ寄与分の線量になります。あわせて 1MU 照射した際の線量 $w_{open}\cdot D'_{open}+w_{wedge}\cdot D'_{wedge}$ になります。

$$\frac{D_{prescribed}}{MU_{total}}=w_{open}\cdot D'_{open}+w_{wedge}\cdot D'_{wedge}$$

以上の式を組み替えてると、最終的な MU の式になります。

$$MU_{total}=\frac{D_{prescribe}}{w_{open}\cdot D'_{open}+w_{wedge}\cdot D'_{wedge}}$$

オープンとウェッジの MU は以下のとおりです。

$$MU_{wedge}=w_{wedge}\cdot MU_{total}$$
$$MU_{open}=w_{open}\cdot MU_{total}$$

なお、10x10, 10cm の条件であれば $D'_{open}=100/ m_{open}$、$D'_{wedge}=100/ m_{wedge}$ です。
Monaco での Motorized Wedge の MU 計算についてはここまでとなります。

【Monaco の手計算例】
Monaco の MU 比の算出方法をこれまでみてきました。この方法を利用して、手計算の一例を以下に示します。
(1) SSD=90cm, 10x10, 処方点が中心軸上 10cm 深, 角度 30 度,一回処方 100cGy
登録値が以下のようになっていたとします。
『Absolute Dose Calibration, 10cm Depth』=0.781[cGy/MU]
『Absolute Dose Calibration, 10cm Depth with Wedge 』=0.205[cGy/MU]

上記登録値から、m_{open} と m_{wedge} を求めます。
$m_{open}=100/0.781=128.0$[MU/Gy]
$m_{wedge}=100/0.205=487.8$[MU/Gy]
角度を Radian にして、g_θ を計算します。
$g_\theta=\tan30 / \tan60=\tan(0.5236)/\tan(1.0472)=0.577/1.732=0.333$
よって、MU 比は
$w_{open}：w_{wedge}=0.344：0.656$

次に、処方点の線量は 100cGy ですので、

$$MU_{total}=\frac{D_{prescribe}}{w_{open}\cdot D'_{open}+w_{wedge}\cdot D'_{wedge}}=\frac{100}{0.344\times0.781+0.656\times0.205}=247.9[MU]$$

$MU_{open}=85.3$[MU]

$MU_{wedge}=162.6$[MU]

Monaco の Voxel サイズの影響により微妙な差異が生じます。その他、Radiological Depth などの影響も考えられます。

(2) SSD=90cm, 20x20, 処方点が中心軸上 10cm 深, 角度 20 度,一回処方 100cGy
登録値が以下のようになっていたとします。
『Absolute Dose Calibration, 10cm Depth』=0.781[cGy/MU]
『Absolute Dose Calibration, 10cm Depth with Wedge 』=0.205[cGy/MU]
オープンの $TSCF(20x20)_{open}$ が 1.095、ウェッジの $TSCF(20x20)_{wedge}$ は 1.138

登録値から、m_{open} と m_{wedge} を求めます。
m_{open}=100/0.781=128.0[MU/Gy]
m_{wedge} =100/0.205=487.8[MU/Gy]
角度を Radian にして、g_θ を計算します。
g_θ=tan20 / tan60=tan(0.3491)/tan(1.0472)=0.364/1.732=0.210
よって、MU 比は
w_{open} : w_{wedge} =0.497 : 0.503

次に処方点における 1MU あたりの線量を手計算で求めてみます。（以下の MU 計算はモデリング用の測定値を利用してます）

D'_{open} =$(Absolute\ Dose\ Calibration)_{open}$×$TSCF(20x20)_{open}$
=0.781×1.095
=0.855[cGy/MU]

D'_{wedge}=$(Absolute\ Dose\ Calibration)_{wedge}$×$TSCF(20x20)_{wedge}$
=0.205×1.138
=0.233[cGy/MU]

処方点の線量は 100cGy ですので、

$$MU_{total}=\frac{D_{prescribe}}{w_{open}\cdot D'_{open}+w_{wedge}\cdot D'_{wedge}}=\frac{100}{0.497\times 0.855+0.503\times 0.233}=184.5[MU]$$

MU_{open}=*91.7*[MU]

MU_{wedge}=*92.8*[MU]

【ウェッジの線量検証について】
治療計画装置によりウェッジの MU 計算は様々です。治療計画装置の計算精度の確認をする場合は、必ず、プランを作成し、そのプランを使って照射しましょう。

【等線量曲線の角度評価について】

前述のウェッジの角度定義からフィルムを使って実際の角度を（例えば分度器を使って）評価することができます。しかし、ウェッジの等線量曲線を角度評価すると 60 度にならないことがあります。この理由はヘッドに内装されているウェッジを共通に使いますので、エネルギーや照射野サイズ、フィルターの組み合わせにより等線量曲線が変わってしまうからです。

治療機に内装されているウェッジが厳密に 60 度でない場合でも、治療計画の最大ウェッジ角度は 60 度と表示されます。表示角度と評価測定による角度が微妙に一致しないものの、それぞれのエネルギー、照射野において、オープン照射とウェッジ照射の測定データを元にモデル化していますので、ウェッジのみの等線量曲線の計算や合成角度の等線量曲線の合成自体は正しく行います。つまり、Monaco が算出する等線量曲線とフィルムの測定を比較すれば一致することがわかるはずです。

さて、線量計算に問題なくとも、実際の合成角度がどうなるか予想したい場合は以下のようにして求めることができます。例えば、物理ウェッジの角度が 58 度だったとし、Monaco 上の合成角度を θ、実際の合成角度をφとします。

$$\frac{\tan\varphi}{\tan 58}=\frac{\tan\theta}{\tan 60} \Rightarrow \tan\varphi=\tan\theta\cdot\left(\frac{\tan 58}{\tan 60}\right)=0.924\times\tan\theta$$

θが 30 度ならばφは 28.1 度です。